

## Otimização do consumo energético em uma indústria gráfica

*Lucas Farias de Menezes*

*Universidade Estadual Paulista – Campus Bauru; Faculdade de Engenharia de Bauru  
lks\_mnzs\_14@hotmail.com*

*Antonio Roberto Balbo*

*Universidade Estadual Paulista – Campus Bauru; Faculdade de Ciências de Bauru  
arbalbo@fc.unesp.br*

*Adriana Cristina Cherri*

*Universidade Estadual Paulista – Campus Bauru; Faculdade de Ciências de Bauru  
adriana@fc.unesp.br*

*Edilaine Martins Soler*

*Universidade Estadual Paulista – Campus Bauru; Faculdade de Ciências de Bauru  
edilaine@fc.unesp.br*

**Resumo:** Neste artigo é proposto um modelo de programação inteira que busca reduzir o consumo de energia elétrica relativo à utilização de conjuntos distintos de impressoras de produção e de acabamento de produto em uma indústria gráfica. O modelo também respeita os limites de tempo de preparação e de operação das impressoras, além de particularidades do item impresso e de demanda diária de produção. O modelo proposto foi implementado em uma linguagem algébrica de programação e testes computacionais preliminares foram realizados com exemplares fornecidos por uma indústria gráfica situada na cidade de Bauru.

**Palavras-chave:** Otimização. Eficiência Energética. Energia Elétrica. Indústria Gráfica.

### Introdução

A progressiva integração dos mercados, aliada ao desenvolvimento cada vez mais rápido de novos produtos tem aumentado a competitividade entre as indústrias. Dentro deste novo cenário, muitas empresas buscam melhorias em seus processos produtivos que abrangem desde a responsabilidade de planejar e aperfeiçoar os processos até sua estrutura organizacional.

Entre os vários fatores que podem afetar os custos operacionais de uma empresa, podemos destacar, entre outros, o elevado consumo de energia elétrica que ocorre devido ao uso de maquinários antigos e o alto custo da tarifa elétrica em determinados horários.

No Brasil, as tarifas de energia elétrica são determinadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que estabelece também os critérios de classificação dos consumidores e as formas de cobrança de energia elétrica. De acordo com a concessionária de energia elétrica, no chamado ‘horário de ponta’, o custo da tarifa é mais elevado e, no Estado de São Paulo, ocorre entre 18h e 21h, exceto no horário de verão que ocorre entre 19h e 22h. De acordo com Soler et al. (2016), como as tarifas de energia elétrica variam ao longo do dia, torna-se necessário nas indústrias um planejamento dos turnos de funcionamento das máquinas.

Para Bermann (2002) existe a necessidade da implementação de políticas públicas que estabeleçam metas objetivas de redução do consumo de energia em grupos de indústrias, por meio de medidas que incentivem a modernização das plantas produtoras e o surgimento de inovações que possam reduzir o consumo energético no processo produtivo nas demandas diárias das indústrias. Em contrapartida, Goldemberg (1998) conta que tais medidas são necessárias para reduzir o consumo, mas desde que não prejudique o crescimento econômico das indústrias e também do Brasil.

Visando uma melhor otimização dos recursos, associado às estratégias para o baixo consumo de energia elétrica, insere-se também a necessidade de melhor dimensionamento das máquinas utilizadas no processo produtivo. Desta forma, os problemas de dimensionamento de lotes (PDL) podem ser utilizados para auxiliar no processo de decisão. De acordo com Karimi et al. (2003), os PDL consistem em determinar a quantidade a ser produzida de cada item e o momento em que a produção deve ocorrer, ou seja, o planejamento está relacionado a um horizonte de planejamento.

Os primeiros trabalhos para a resolução dos PDL foram propostos por Manne (1958) e Wagner e Whitin (1958) os quais abordam o problema com um único tipo de item a ser produzido e sem restrições quanto a capacidade de produção para esse item.

Uma extensão para esse problema envolve a tomada de decisão para realizar a produção de vários itens num mesmo período de tempo. Neste problema, conhecido como PDL Multi-Itens, além de determinar a quantidade de cada item a ser produzida, deve-se levar em consideração que estes itens possuem um custo de produção, de preparação e de armazenamento em estoque. Além disso, pode-se considerar que há um tempo para que cada item seja produzido e para a preparação da linha de produção (máquina).

Trigeiro et al. (1989) apresentaram o primeiro trabalho com um método para a resolução do PDL com tempos de preparação para produção. Basicamente, o método consiste em dualizar as restrições de capacidade e os subproblemas obtidos são resolvidos de forma exata pelo método proposto por Wagner e Whitin (1958).

A literatura referente aos PDL é bastante vasta, assim como inúmeros trabalhos que apresentam estudos e propostas para a redução do consumo de energia elétrica no setor industrial. Entretanto, trabalhos que consideram as duas abordagens simultaneamente não foram encontrados. Entre as várias empresas com alto consumo de energia elétrica e necessidade de planejamento em sua linha de produção, destaca-se as indústrias gráficas, principalmente as que possuem maquinários mais antigos.

Na indústria gráfica, como o processo de transformação da matéria prima em um item finalizado é feito somente por máquinas, tem-se um elevado consumo de energia elétrica. Além disso, há outros fatores que também contribuem para este gasto, como o de ligar e desligar a mesma máquina mais de uma vez durante o dia e seu mecanismo analógico ao invés do digital que, conseqüentemente, aumenta seu tempo de preparo.

Desta forma, este trabalho desenvolve um estudo voltado para a otimização do consumo energético em indústrias gráficas. O problema estudado considera os diversos itens que as indústrias são capazes de produzir junto às suas respectivas demandas. Um modelo matemático linear inteiro foi proposto para representar esse problema visando a melhor distribuição de itens simultaneamente à utilização de máquinas, para que o consumo de energia elétrica seja o menor possível para cada máquina selecionada.

O modelo proposto foi implementado utilizando uma linguagem algébrica de programação e testes preliminares foram realizados com dados reais de uma indústria gráfica situada na cidade de Bauru-SP.

Em continuidade deste trabalho, na segunda seção apresenta-se o modelo matemático proposto para representar o problema em estudo. Na terceira, apresenta-se os testes computacionais preliminares. A quarta traz as considerações finais e propostas para a continuidade deste trabalho.

## Formulação Matemática

O modelo matemático proposto para representar o problema de dimensionamento da produção e redução do consumo de energia elétrica foi formulado a partir de informações fornecidas por indústrias gráficas da cidade de Bauru e da distribuidora de energia do mesmo local. Com isso, foi

possível realizar uma escolha das máquinas mais apropriadas a serem usadas no processo de confecção de cada item, levando em conta a sua demanda e a capacidade de produção das máquinas envolvidas.

Basicamente, o problema consiste em otimizar o processo de produção em indústrias gráficas a fim de melhor dimensionar a produção e minimizar o custo de energia elétrica gasto com impressoras e máquinas de acabamento. Para isso, existem restrições como: o tempo de impressão (ou acabamento) de todas as demandas em determinada máquina não deve exceder a capacidade diária da mesma máquina e cada demanda deve passar por apenas uma máquina de impressão e uma máquina de acabamento.

A seguir, a notação utilizada no modelo matemático proposto é definida.

Índices:

$j$  = máquinas de impressão,  $j = 1, \dots, n_1$

$k$  = máquinas de acabamento,  $k = 1, \dots, n_2$

$i$  = tipo de item,  $i = 1, \dots, m$

Parâmetros:

$c_{ij}^P$ : custo total de impressão da demanda do item  $i$  na máquina  $j$ ;

$c_{ik}^F$ : custo total para realizar o acabamento da demanda do item  $i$  na máquina  $k$ ;

$t_{ij}^P$ : tempo total de impressão da demanda do item  $i$  na máquina  $j$  (em horas);

$t_{ik}^F$ : tempo total para o acabamento da demanda do item  $i$  na máquina  $k$  (em horas);

$Cap_j^P$ : capacidade de impressão da máquina  $j$  (em horas);

$Cap_k^F$ : capacidade de acabamento da máquina  $k$  (em horas);

$C$ : valor do kW/h (em Reais);

$k_j^P$ : consumo de energia elétrica da máquina impressora  $j$  (em kW/h);

$k_k^F$ : consumo de energia elétrica da máquina de acabamento  $k$  (em kW/h);

$a_j^P$ : tempo de *setup* da máquina de impressão  $j$ ;

$a_k^F$ : tempo de *setup* da máquina de acabamento  $k$ ;

$Q_i$ : demanda do item tipo  $i$ ;

$v_j^P$ : velocidade de impressão da máquina  $j$  em metro/h;

$v_k^F$ : velocidade de acabamento da máquina  $k$  em metro/h;

$h_i$ : altura ou formato do formulário (metros);

Variáveis de decisão:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a máquina } j \text{ é acionada para realizar a impressão da demanda do item } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{se a máquina } k \text{ é acionada para realizar o acabamento da demanda do item } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2)$$

O modelo matemático proposto é apresentado a seguir:

$$\min \quad z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_1} c_{ij}^P x_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{n_2} c_{ik}^F y_{ik} \quad (3)$$

$$\quad (4)$$

$$\quad (5)$$

$$\text{sujeito à } \begin{cases} \sum_{i=1}^m t_{ij}^P x_{ij} \leq \text{Cap}_j^P, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n_1 \\ \sum_{i=1}^m t_{ik}^F y_{ik} \leq \text{Cap}_k^F, \quad k = 1, 2, 3, \dots, n_2 \\ \sum_{j=1}^{n_1} x_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n_1 \\ \sum_{k=1}^{n_2} y_{ik} = 1, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n_2 \\ x_{ij} \in \{0,1\} \\ y_{ik} \in \{0,1\} \end{cases}$$

No modelo (1)-(5), a função objetivo definida em (1) visa distribuir as demandas disponíveis para a produção nas máquinas de impressão e acabamento de modo a ser selecionado o fluxo com o menor consumo de energia possível para o período definido. As restrições (2) e (3) representam a capacidade de produção das máquinas de impressão e acabamento. As restrições (4) e (5) asseguram que a demanda de um determinado item  $i$  pode ser impressa em uma única máquina  $j$  e receber o acabamento de uma única máquina  $k$ .

Os custos de impressão e acabamento dos itens foram obtidos respectivamente pelas equações  $c_{ij}^P = C(k_j^P(\alpha_j^P + t_{ij}^P))$  e  $c_{ik}^F = C(k_k^F(\alpha_k^F + t_{ik}^F))$ , e, por fim, o tempo de impressão e acabamento dos itens foram obtidos pelas equações  $t_{ij}^P = \frac{Q_i \cdot h_i}{v_j^P}$  e  $t_{ik}^F = \frac{Q_i \cdot h_i}{v_k^F}$ , respectivamente.

## Resultados computacionais

Para verificar o desempenho do modelo proposto, foram utilizados dados fornecidos por uma indústria gráfica sediada na cidade de Bauru-SP. Para efeitos de comparação, a instância utilizada para os testes numéricos foi obtida a partir de uma carteira de pedidos que já estava em produção. Esta produção refere-se a um dia de trabalho na indústria.

O modelo matemático (1) - (5) foi implementado na plataforma GAMS versão 24.3.1 e utilizou o Solver CPLEX versão 12.6.3.0. Os custos e tempos operacionais foram calculados utilizando os dados da indústria. Na Tabela 1, estão as características gerais de todas as máquinas disponíveis em seu parque gráfico, entre eles, os tipos de máquinas (Impressão (Imp) ou Acabamento (Acab)), as velocidades de trabalho destas (metro/h), tempos de *setup* (minutos) das máquinas de impressão e de acabamento e consumo (kW/h).

Tabela 1 - Ficha Técnica dos Maquinários

Maquinas	Velocidade (metro/h)	Setup (minutos)	Consumo (kW/h)
Imp01	10500	15	7872
Imp02	3000	30	240
Imp03	7800	20	4000
Imp04	12000	10	17920
Imp05	9000	15	6400

Acab01	3600	30	264
Acab02	23600	45	3840

A carta de pedido dos clientes (CI), contendo as demandas (un) totais dos itens é apresentados na Tabela 2. A demanda de cada cliente é composta por apenas um tipo de item.

Tabela 2 - Dados da Demanda

Cientes	Demanda (un)
CI01	15000
CI02	20000
CI03	250000
CI04	300000
CI05	50000

Os valores do custo de energia elétrica foram extraídos a partir da conta da empresa sendo de 0,3425 centavos/kw durante seu horário de funcionamento. Com os dados apresentados nas tabelas 1 e 2, obteve-se os resultados de quais máquinas de impressão e de acabamento que deveriam estar ativas para a minimização do consumo energético de produção da indústria e atendimento da demanda de materiais dos clientes. Os resultados apresentados na Tabela 3 indicam quais máquinas deveriam estar ativas '1' e quais deveriam estar inativas '0'.

Tabela 3 - Resultados a partir da execução do solver CPLEX/GAMS

	CI01	CI02	CI03	CI04	CI05
Imp01	0	0	0	0	1
Imp02	0	1	0	0	0
Imp03	0	0	0	1	0
Imp04	1	0	0	0	0
Imp05	0	0	1	0	0
Acab01	1	1	1	1	1
Acab02	0	0	0	0	0

De acordo com a Tabela 3 as máquinas de impressão Imp01 deveria ser utilizada para a produção da demanda CI05, a Imp02 para a produção da demanda CI02, a Imp03 para a produção da demanda CI04, a Imp04 para a produção da demanda CI01 e por fim a Imp05 para a produção da demanda CI03. Para a parte de acabamento a única máquina ativada para atender toda as demandas de todos os clientes foi a Acab01. Esta escolha ocorreu devido ao baixo consumo energético dessa máquina. Mesmo sua velocidade de trabalho sendo inferior, todas as demandas foram atendidas.

O tempo computacional para a execução do modelo foi de 0,309 segundos.

## Considerações finais e trabalhos futuros

Este trabalho propõem um modelo matemático para representar o planejamento da produção de materiais impressos personalizados de uma gráfica localizada na cidade de Bauru-SP. Associado ao planejamento da produção, o modelo busca otimizar o consumo energético para o atendimento da



demanda de clientes. O modelo proposto foi implementado utilizando a linguagem algébrica de programação GAMS, utilizando o Solver CPLEX.

Como continuidade do trabalho, pretende-se incluir horizontes de planejamento e a possibilidade de gerar itens para estoque. Além disso, pode-se considerar que, nem todas as máquinas de acabamento do item podem ser utilizadas para finalizar todos os tipos de materiais demandados.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPESP (Proc. n.2014/20853-0) pelo suporte financeiro.

## Referências

BASSANEZI, R. C.; FERREIRA Jr, W. C. **Equações diferenciais com aplicações**. 1.ed. Harbra: São Paulo, 1988.

BERMANN, C. **Energia no Brasil: para quê? Para quem? Crise e Alternativas para um país sustentável**. 1. Ed. Livraria da Física/FASE: São Paulo, 2002.

GOLDEMBERG, J. 1998. **Energia e desenvolvimento**. Estudos Avançados volume 12 no. 33. USP, São Paulo, 1998.

KARIMI, B.; FATEMI GHOMI, S. M. T.; WILSON, J. M. Omega. **The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms**. v. 31, p. 365-378, 2003.

MANNE, A.S. Management Science. **Programming of economic lot sizes**. p. 115 - 135, 1958.

SOLER, E. M.; TOLEDO, F. M. G.; DOS SANTOS, M. O.; ARENALES, M. N. Production. **Otimização dos custos de energia elétrica na programação da captação, armazenamento e distribuição de água**, v. 26, n. 2, p. 2-5, 2016.

TRIGEIRO, W. W.; THOMAS, J.; MCCLAIN, J. O. Management Science. **Capacitated lot sizing with setup times**. v. 35, n. 3, p. 353-366, 1998.

WAGNER, H.; WITHIN, T. Management Science. **Dynamic version of the economic lot size model**, v. 5, p. 89-96, 1958.